

两相脉冲爆震发动机模型试验研究^{*}

黄希桥, 严传俊, 张 群, 雷恒仁, 范 玮

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了探索气-液两相脉冲爆震发动机模型内特征参数对产生爆震波的影响规律, 系统地测试了以汽油为燃料、以空气为氧化剂的气-液两相脉冲爆震发动机模型在不同点火频率及不同余气系数下爆震波的峰值压力以及平均爆震波速, 并对其变化进行了分析。通过分析实验结果发现, 当余气系数 α 增大时, 爆震波发动机性能下降, 在爆震室长度一定时, 点火频率等于脉冲爆震频率。

关键词: 两相燃烧; 脉冲爆震发动机; 脉动式喷气发动机; 模型试验

中图分类号: V235. 22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0108-03

Experimental study on two-phase pulse detonation engine model

HUANG Xi-qiao, YAN Chuang-jun, ZHANG Qun, LEI Heng-ren, FAN Wei

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to investigate the influence of characteristics parameters on detonation wave in a two-phase pulse detonation engine model. The peak detonation pressures and average velocities of two-phase pulsed detonation wave produced by PDE model using gasoline as fuel and air as oxidizer under various ignition frequencies and various mixture ratios are measured systematically, and the relations influencing them are analyzed. The experimental results have shown that for a given length of PDE model the performance of PDE model decreases with increase of α and the ignition frequency is equal to the pulse detonation frequency.

Key words: Two phase combustion; Pulse detonation engine; Pulsejet engine; Model test

1 引 言

脉冲爆震发动机 PDE(Pulse Detonation Engine) 是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机^[1,2], 与一般的喷气发动机不同, 爆震波能产生极高的燃气压力(大于 1 MPa~ 10 MPa), 燃气温度(大于 2800 K) 及燃烧速度(爆震波马赫数大于 4)。由于脉冲爆震发动机在动力部分没有高速转动部件, 结构简单, 且具有高效的热力循环, 因此是一种低成本的动力装置。它能以吸气式发动机方式和液体火箭发动机方式工作, 又是组合推进系统的理想候选者。

国外许多的 PDE 实验, 大都采用气体燃料与氧气的混气产生爆震。我们则采用汽油为燃料、以空气为氧化剂产生爆震, 从而使模型实验更接近发动机工作的实际。本文在爆震波传播数值模拟^[3,4] 的基础上, 对 PDE 模型内的特征参数进行了系统的测试及研究, 填补了国内在两相脉冲爆震试验研究方面的空

白, 为以后研制实用的两相脉冲爆震发动机提供实验依据和技术储备。

2 实验装置

两相脉冲爆震发动机原理性试验模型的装置示意图如图 1 所示, 由供油系统、供气系统、爆震点火及频率控制系统、混合室、爆震室、压力测量系统以及数据采集系统等部分组成^[5]。混合室由内径为 0.02 m, 外径为 0.025 m 的钢管加工而成。爆震室由内径为 0.03 m, 外径为 0.04 m 的钢管加工而成。爆震室(包括混合室)的头部封闭, 尾端敞口。其中爆震室总长 2.0 m, 混合室长 0.28 m。在混合室出口处安装火花塞, 由频率在 1 Hz~ 100 Hz 范围内连续可调的爆震点火及频率控制系统控制起爆。在火花塞后(位置 1, 图 1 中 6) 放置了压力传感器 1, 再在与它相距 1m (位置 2, 图 1 中 7) 处放置了压力传感器 2, 爆震室比较长主要是为了便于精确地测量爆震波速度。在混

^{*} 收稿日期: 2000-06-01; 修订日期: 2000-10-18。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59386027)。

作者简介: 黄希桥 (1973—), 女, 硕士, 助教, 研究领域为燃烧理论。

合室头部, 燃料采用直射方式, 空气采用切向进气方式, 以增加空气的紊流波, 有利于燃料的雾化及与空气的掺混。

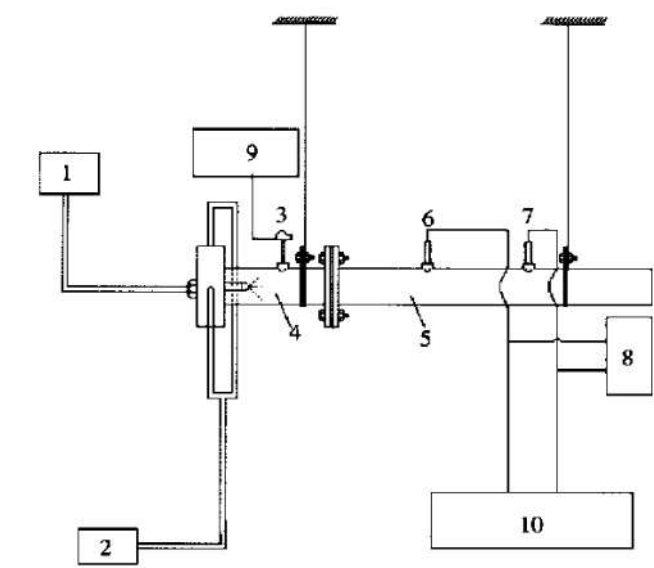


Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement
1) Fuel supply 2) Air supply 3) Spark plug 4) Mixing chamber 5) Detonation chamber 6) Position one 7) Position two 8) Digital storage oscilloscope 9) Detonation initiation and frequency control system 10) Electric charge amplifier and date collection system

3 实验方法

为使模型试验接近实际发动机工况, 采用了连续、非预混掺混供气方案。为了在爆震室中充满混合均匀的可爆混合气, 在脉冲爆震发动机的封闭端与爆震室之间装有一个燃料与氧化剂的混合室。在爆震室内采用了增强爆震结构。实验采用可爆性较差的汽油为燃料, 压缩空气为氧化剂, 分别在 4, 6, 8, 10Hz 4 种频率下对爆震波的特征参数进行了对比实验研究, 实验中汽油采用压差供油。空气由压缩气泵供给, 供气、供油由相应的调节阀控制, 供油量由浮子流量计测定, 供气量由涡街流量计测定。实验时, 首先设定点火频率, 然后调节供气速度和供油速度直至产生脉冲爆震为止, 由供气和供油速度计算出此时的余气系数 α 。爆震室内的压力通过压电式压力传感器发出的信号送到电荷放大器再传输到计算机数据采集系统测量^[6]。在位置 1 处放置了压力传感器 1, 在与它相距 1 m (位置 2) 处放置了压力传感器 2, 则由位置 1 与位置 2 之间的距离 Δx 和同一爆震波在位置 1 与位置 2 的压力达到峰值之间的时间差 Δt , 可求得平均爆震波速。

4 实验结果与分析

实验分别测试了点火频率为 4, 6, 8, 10 Hz 时的爆震

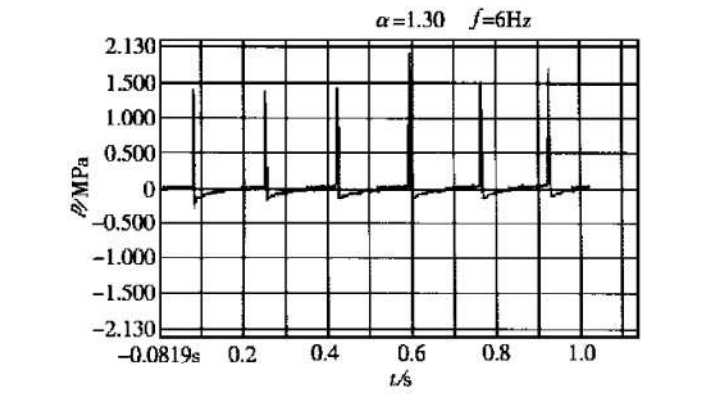


Fig. 2 Instant detonation obtained at present

波峰值压力及平均爆震波速。早期实验所获得的爆震波压力较低, 峰值压力大约为 0.3 MPa, 只产生了弱爆震。经过几年的探索, 通过改进油气混合, 增强湍流强度, 协调燃料和空气的喷射速度与起爆频率的关系等措施^[5~8], 获得了接近 G-J 爆震的爆震波波形, 如图 2 所示。图 3 是从图 2 中取出的第 4 个爆震波波形, 不难看出, 在本实验条件下已经产生了充分发展的爆震。固定点火频率下不同余气系数时以及固定余气系数不同点火频率时的测试结果, 列于表 1 和表 2 中。

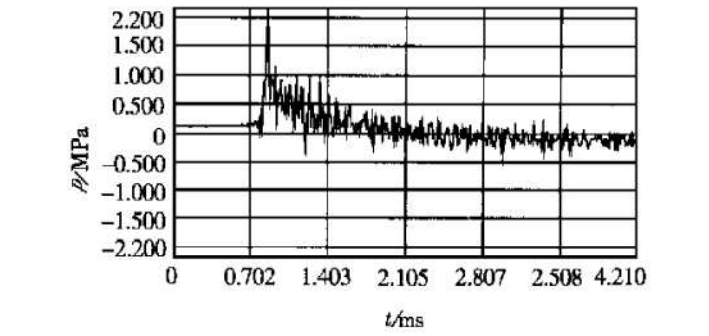


Fig. 3 A single detonation wave obtained at a given frequency $f = 6$ Hz

Table 1 Even detonation velocities (V_d) and peak detonation pressure ratios (p_2/p_1) through calculations and experiments under various mixture ratios at a given frequency $f = 8$ Hz

α	Computational value		Experimental value	
	V_d	p_2/p_1	V_d	p_2/p_1
1.00	1 792	18.60	1 685.22	17.58
1.25	1 715	16.78	1 586.72	15.69
1.30	1 680	16.33	1 503.48	14.59
1.57	1 600	14.20	1 378.34	12.74

Table 2 Even detonation velocities(V_d) and peak detonation pressure ratios(p_2/p_1) through calculations and experiments under various frequencies at a given mixture ratio $\alpha=1.25$

f	Computational value		Experimental value	
	V_d	p_2/p_1	V_d	p_2/p_1
4	1 715	16.78	1 492.11	14.71
6	1 715	16.78	1 545.65	15.10
8	1 715	16.78	1 586.72	15.69
10	1 715	16.78	1 609.67	15.85

在表 1 中,通过比较可以发现,当点火频率 $f=8$ Hz 时,不同余气系数下,爆震波速与爆震波压力比的实验值总比理论上的计算值低。这是因为理论值是针对气相 C_8H_{16} (汽油)与空气的混合物所计算出的爆震波速与爆震波压力比。而实验中汽油是液态的,由于雾化不良,掺混不均及汽油蒸发时吸收汽化热等原因,从而导致实验值比理论上的计算值低。从表 2 可以看出,当余气系数一定时($\alpha=1.25$),理论上的爆震波速及爆震波压力比不随点火频率的改变而变化,但随着点火频率的增加,实验中测得的爆震波速及爆震波压力比均逐渐增大,这是由于点火频率增大时,供油、供气速度相应增大,汽油雾化改善,油/气混合更加均匀,湍流度增大,更易形成爆震。

由图 2 可见,脉冲爆震频率与点火频率相一致,这是由于当爆震室长度一定时,一个爆震循环的时间 $t_c=t_d+t_r+t_f$,其中 t_d 为爆震波在爆震室内的传播时间, t_r 为敞口端反射膨胀波在爆震室中的传播时间, t_f 为新鲜可燃混合物充填爆震室的时间^[4]。由于 $t_r \ll t_f$, $t_d \ll t_f$,因而,一个爆震循环的时间近似等于新鲜可燃混合物充填爆震室的时间。也即脉冲爆震频率主要决定于可燃混气的充填速度,而点火频率要与可燃混气的充填速度相适应,因此,点火频率应与爆震频率相一致。

5 结 论

(1) 在本实验条件下,用可燃性较差的汽油/空气混合物可以产生稳定的、充分发展的爆震。

(2) 可燃震混合物的余气系数对爆震波发动机的性能有一定影响。

(3) 当爆震室长度一定时,脉冲爆震频率主要决定于可燃震混合物的充填速度,因此,点火频率应等于脉冲爆震频率。

参考文献:

- [1] Bussing T, Pappas G. A novel very-low-cost airbreathing propulsion system [R]. SBIR Phase I Final Report, USAF Contract F-33615-92-C-2270, 1992, 12.
- [2] 严传俊,刘军,范 玮,等. 脉冲爆震发动机工作原理与循环分析[J]. 推进技术, 1996, 17(3).
- [3] 何立明,严传俊,范 玮. 混合气体燃烧中的爆震波传播机理[J]. 推进技术, 1997, (18) 2.
- [4] 何立明,严传俊,范 玮,等. 爆震波在爆震燃烧室内传播过程的数值模拟[J]. 推进技术, 1998, 19(6).
- [5] 何立明,严传俊,范 玮,等. 脉冲爆震发动机的可燃范围及内流燃气温度与壁温的实验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(3).
- [6] 范 玮,严传俊,何立明,等. 原理模型脉冲爆震发动机性能参数的实测与分析[J]. 航空动力学报, 1997, 12(4).
- [7] 何立明. 脉冲爆震发动机的性能分析和实验研究[D]. 西北工业大学, 1997.
- [8] 范 玮. 两相脉冲爆震发动机的模型实验与分析[D]. 西北工业大学, 1998.

(编辑: 王居信)